

生物质预处理技术及其对热解产物的影响综述

胡海涛, 李允超, 王贤华*, 张帅, 杨海平, 陈汉平

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉430074)

摘要：总结了国内外各种生物质预处理技术及其对热解产物的影响的研究现状，分析了不同预处理方法的优势及存在的问题，指出微波干燥预处理是一种快捷的生物质干燥方式；脱灰预处理能加快生物质热解速率，并实现糖类组分的富集；而烘焙预处理则能提高生物油的热值。

同时介绍了一些新型生物质预处理技术，如离子液体预处理可以减少裂解反应时间，使生物油产率得到提升；而水热预处理则能使生物油中糖含量(主要是左旋葡聚糖)显著增加。

并指出了今后的研究方向为：努力提高各种预处理方法的效率并降低预处理技术的成本；进一步改善现有预处理方法甚至发现新的预处理方法；通过学科交叉探索新的物理化学生物预处理技术；期望原料的预处理可以增加生物油中某些有特殊价值物质的含量或同时得到具有较高利用价值的气液固热解产物。

化石能源短缺的现状及化石燃料使用所带来的环境问题使开发环境友好的可再生能源成为当前能源领域的热点之一。生物质因其储量丰富、廉价易得、可再生、环境友好的优点成为理想的可再生能源。

近年来热解技术的迅速发展使其成为生物质利用技术中较为高效和成熟的技术之一。热解可将生物质转化为气液固三态产物，每种产物均具有较高的利用价值，根据反应温度和加热速率的不同，生物质热解分为慢速热解、快速热解和闪速热解。慢速热解是生物质以 $0.1\sim 1^{\circ}\text{C/s}$ 的较低速率升温到 $300\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，并且热解产物停留10min以上的热解，主要用于最大限度增加炭的产量；快速热解是在 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的中等温度、几百至 1000°C/s 的升温速度、小于1s的气相停留时间的条件下进行的，主要用于获取液体产物；而闪速热解的升温速率大于 1000°C/s ，热解产物停留时间小于0.5s，主要用来增加生物油的产量。

然而，无论是采用慢速热解还是快速、闪速热解，限于生物质原料特性，如组分复杂、含水量高、含氧量高、能量密度低和不稳定等缺点，导致热解产物特别是液体产物热值低、黏度高、含水量高、酸性强、易挥发和稳定性差，不利于其利用。

预处理是生物质热解前的加工环节，会对生物质的特性(包括颗粒度、水分、挥发分和灰分等)产生影响，从而改变生物质热解过程及其产物的分布与性质(如较细的颗粒度和较低的灰分含量有利于提高生物油的产率，水分和挥发分含量降低有利于提高生物油的品质)，预处理也是有效控制热解产物特性的方法之一。探索适合、有效，特别是能够改变生物质内在结构、提高热解效率及提高热解产物品质和产量的预处理技术具有重要意义。为此，笔者对相关预处理技术的研究现状进行了综述，对其中有效的预处理技术进行了总结，并提出了建议。

1 生物质热解的预处理技术

目前，基于热解利用的生物质预处理技术主要分为物理法、化学法、物理—化学法和生物法4大类。

1.1 物理法

物理法是指不破坏生物质化学结构的一种预处理方法，主要包括粉碎预处理和干燥预处理技术。

适合的物理法可以有效改善生物质特性，提高生物质热解效率以及提升生物油的品质。

1.1.1 粉碎预处理 固体物质在外力作用下碎裂的过程叫做粉碎。其中，大块物料碎裂成粒度为 $1\sim 5\text{mm}$ 的小块称为破碎；小块物料碎裂成粒度小于 1mm 的细粉称为粉磨。这一过程可在粉碎机上完成。

粉碎技术能够使生物质表面积增大，颗粒度减小。刘运权等发现生物质颗粒的大小对热解具有较大的影响，颗粒减小的同时生物油产率一般随之增加。从物质和能量传递的角度分析，这是因为较小的生物质颗粒有利于加热介质与生物质间的传热，加快生物质分解速度，且挥发分快速离开热解反应区，使一次裂解在二次裂解发生之前反应完全，从而提高生物油产率。

从反应温度的角度分析, 生物质粒径过大会使升温时间增加, 从而在较低温度下发生热解反应以及二次裂解, 增加炭和不冷凝气体的产率, 减少生物油的产率。WanIsahak等的研究得出了类似的结论, 但他同时指出, 过细的颗粒度会带来预处理成本的增加, 而且粒径过细会发生热解不完全现象, 热解产物也不宜分离。由此可见, 粉碎是热解前必备的工序, 适宜的颗粒度有利于提高生物油产率。值得注意的是, 生物质最佳的粒度没有统一标准, 主要由生物质种类和热解所用装置决定。例如纤维素组分高的生物质原料, 颗粒粒径的要求可以适当放宽。

1.1.2干燥预处理一般生物质原料中水分含量较高, 若直接热解将会降低生物油的热值及品质, 不利于生物油的应用, 从能量利用的角度也是不利的, 水分的蒸发阻碍了热解反应的发生, 降低传热速率, 且水分先蒸发后冷凝, 产生能量损失, 因此原料的干燥是不可缺少的步骤。干燥技术包括自然干燥、热风干燥和微波干燥。其中自然干燥不需要专门的设备, 但效率最低, 难以控制原料的含水量, 故一般只将其作为预处理的第一个步骤。

热风干燥是热量由外向内传递从而让水分气化蒸发, 但该方式缺点是加热时间较长、效率较低。陈登宇等采用热风干燥稻壳, 发现处理后稻壳的组分及化学结构无明显变化, 但表面结构却发生改变, 内表面不再光滑致密而呈破碎状, 出现大量空洞和裂纹, 这有利于传热以及挥发分的析出。微波干燥是使原料置于微波电磁场进行无温度梯度的加热, 具有均匀、快速和节能的显著优势。

王贤华等研究表明微波干燥的速率快于热风干燥速率5倍以上, 有利于纤维素和半纤维素的热解; 同时, 微波干燥后原料内部的孔隙结构得到改善, 这有利于挥发分的析出, 缩短停留时间, 抑制生物油蒸汽的二次裂解反应, 从而提高生物油产量, 而一次热解产物含量的增加也有利于提高生物油的品质。由此可见, 微波干燥相对另两种干燥技术, 更有利于提高干燥的效率以及提升生物油产率和品质。考虑到微波干燥成本较高, 因此可以与成本较低的热风干燥结合, 实现生物质的快速高效干燥。

需要指出的是, 完全干燥也没有必要, 适当的水含量对热解是有利的, 能够提高液体产率和品质等。

1.2化学法

化学法预处理是指采用化学试剂预处理生物质, 它同样可以改善生物质特性, 如脱灰和添加金属盐预处理技术能够改变生物质中金属元素的组成含量等。化学法预处理可以对生物质热解速率以及三态产物分布产生影响, 主要包括脱灰预处理、添加金属盐预处理、有机溶剂预处理和离子液体预处理。

1.2.1脱灰预处理技术生物质主要由纤维素、半纤维素、木质素以及少量的灰分组成。其中灰分中含有少量的金属元素, 如Ca、Al、Na、Fe和K等, 它们直接影响生物质热解。研究表明, 金属盐含量越多, 生物油产率越低, 且生物油中易挥发成分也越多, 产生的酸也多, 而酸的存在不利于生物油的稳定性, 从而降低生物油品质。因此, 为了提高生物油的产率及品质, 可以采用脱灰预处理。脱除灰分通常采用的方法为洗涤, 包括水洗和酸洗两种方法。

一般认为, 水洗不会对生物质的组分产生显著影响, 对灰分的剔除效果一般; 而稀酸洗涤则可将生物质中的灰分清除的较为彻底, 但同时也可能对生物质的组分产生一些结构上的影响, 影响程度主要与酸的种类有关。杨昌炎等通过实验证明了水洗、硝酸酸洗对生物质结构没有大的影响, 但酸洗脱除金属离子程度要高于水洗。其中硝酸酸洗能脱除78%的Ca盐, 并完全脱除K盐, 但水洗只能脱除K盐。

辛芬的研究得出了与杨昌炎相似的结论。此外, 钾钙两种盐分的脱除有利于左旋葡聚糖等较大分子产物的生成, 从而增加生物油中某些具有特殊价值的物质的含量。Stephanidis等也发现酸洗有利于提升糖(特别是左旋葡聚糖)产量, 同时生物油中的羧酸, 酮类以及酚类含量下降。谭洪等进行了不同酸预处理对热裂解影响的实验研究, 结果表明酸洗明显降低了生物质中的金属离子含量, 同时热裂解后气体和焦炭产量降低, 而焦油产量升高。

其中盐酸对热裂解产物分布影响最强。姬登祥等使用去离子水和质量分数分别为3%、7%和10%的盐酸、硫酸和磷酸溶液对稻秆进行水洗和酸洗处理。结果是水洗和酸洗对脱除金属K盐效果较明显; 盐酸和磷酸溶液的浓度对稻秆热裂解特性的影响不显著; 但硫酸溶液浓度提高, TG曲线和DTG曲线变化显著,

且酸洗有利于挥发分的析出。原因可能是稻秆孔道被清洗干净, 使挥发分析出更通畅。陈东雨等对酸预处理甜高粱茎秆残渣的热解以及酸预处理棉花秆的热解研究也表明盐酸酸洗有利于挥发分的析出。丁同利等将经过脱灰预处理的麦秸在440℃下热解发现得到的生物油产量提高, 且油中C含量增加O含量减少, 生物油品质得到提升。Wang等对松木原料进行稀酸预处理, 结果表明预处理会对油产量及其组分产生影响, 特别是1%的H₂SO₄

的处理得到的油产量及品质(高pH值、高热值和低含水量)是最好的。以上研究人员的结论表明脱灰预处理能除去部分金属离子,有利于挥发分的析出,提高生物油的产率并得到含酸量低、含氧量低、含灰量低和含糖量高的高品质生物油,但脱灰技术增加了预处理的成本,需要综合考虑。

1.2.2添加金属盐预处理技术对于添加金属盐预处理,许多研究表明金属盐对生物质热解反应具有催化作用,并且热解转化率随着金属盐浓度的增加而增加。武宏香等的实验结果显示,碱金属能促进纤维素在较低温度分解,但会降低反应速率并增加固体产物产率,同时导致气体产物中CO

和 $C_2(C_2H_4、C_2H_6及C_2H_2)$ 体积分数降低、 CO_2 和 CH_4

含量提高。这与谭洪等得出的钾离子明显促进了

热解气体产物中 CO_2

的生成同时抑制了CO的生成的结论是一致的。谭洪等还发现钾离子能够降低生物油的产量而得到更多的焦炭和气体产物。钙离子催化焦炭生成的作用比钾离子更好,而镁离子作用最不明显。

杨

昌炎等通

过预处理玉米秸秆

发现K和Ca在热解中起到的催化作用

能促使秸秆热解向小分子(如羟基乙醛, CO_2

和酸类等)的产物转化。王震亚等将 K_2CO_3

与白松木屑以干法混合和湿法混合两种不同的方式进行混合,结果表明两种方法都会使白松裂解气体的产率上升且各组成气体的释放温度前移,同时液体产率下降。对比后发现干混的催化效果好于湿法。王贤华等通过实验也发现适量的 K_2CO_3 有利于生物质的热解,并使其热解温度降低。

辛芬的研究同样显示:大量金属盐可以提高焦炭产量。

K_2CO_3

对热解特性影响明显,使生物质的最大热解速率明显减小。牛艳青等通过对金属元素(Al/Fe/Na/K/Zn/Ca)催化木屑的快速热解得出

结论:加金属元素使生物质

的热解速率降低,热解反应速率大小依次为:不加添加

剂 $>Al_2O_3>Fe_2O_3$

$>ZnO>KCl>CaO>NaCl$ 。此外,通过FTIR分析还发现含金属元素添加剂的加入能够抑制CO的产量,抑制能力依次为 $Fe_2O_3>ZnO>NaCl>CaO>KCl>Al_2O_3$; $Al_2O_3/Fe_2O_3/ZnO$ 的添加可以缩短 CH_4

和CO的析出时间。以上研究结论总结起来,金属盐预处理起到的作用与脱灰预处理正好相反,它虽然会使反应速率下降,降低生物油产量,但作为催化剂,能对热解反应产生催化效应,且使热解温度降低。此外,如果想要通过热解得到更多的焦炭和气体等目标产物,可以在预处理成本允许的情况下采用添加金属盐预处理技术。

1.2.3有机溶剂预处理在一些文献中,报道了研究人员利用有机溶剂(如乙酸铵、丙酮和乙醇等)处理生物质并在一定程度上改变了其特性。Saddawi等用有机溶剂乙酸铵处理生物质,发现生物质中碳氢含量没有很大变化,而氮含量有所增加,灰分含量降低(脱除有机盐分),因此乙酸铵预处理效果类似于脱灰预处理。Carrier等提到有机溶剂乙醇和丙酮能够改变纤维素纤维的排列方向,能够提高热解产物的产率。他在实验中发现乙醇和丙酮预处理更倾向于减少有机抽取物而不改变生物质木质素的分布,因此DTG曲线与未处理的生物质大致相同,但预处理后生物质灰分含量较低,且热解开始的温度比用酸预处理的更高。对于更多种类的有机溶剂作用于生物质热解过程还有待于进一步研究。

1.2.4离子液体预处理离子液体是由有机阳离子和有机或无机阴离子组成的盐类化合物,在室温或稍高于室温的条件下呈液态。离子液体也被称为室温离子液体、室温熔融盐、有机离子液体等。一般的离子化合物只有在高温情况下才是液体状态,因此,离子液体呈液态温度范围广,有较好的化学和热稳定性,在有机合成等方面有着广泛的应用。其中离子液体在生物质热解上的应用也得到了一定研究。

通常,生物质很难溶于水及一般溶剂,但纤维素却能很好溶解于某些离子液体中,从而适用于纤维素热解的反应中。Zhang等研究表明,纤维素无需其他预处理便可以溶解在离子液体[AMIM]Cl中,同时[AMIM]Cl耐热性强,利于回收。罗慧谋等发现离子液体[HeMIM]Cl是纤维素的优良溶剂,70℃时纤维素溶解能力为5%~7%。柯改利指出阴离子为强氢键受体如 (Cl^-) 的离子液体,可以溶解纤维素的原因是 Cl^-

与纤维素分子支链上的羟基可以形成新的氢键,使纤维素分子内及分子间的氢键破坏,从而降低纤维素的结晶度。柯改利利用离子液体对生物质结晶度降低的特性,能够使生物质快速裂解,从而节约热解反应时间。

他还提到离子液体预处理生物质所得生物油的产率也要高于大部分化学方法处理后所得生物油产率。离子液体预处理的另一个优点是简化生物质资源利用过程中化学成分的分析。离子液体作用于生物质裂解的机理性研究还鲜有报道,具有一定的研究价值,但离子液体的合成与制备成本较高,且离子液体在反应过程中会发生热解损耗,每次试验后只有61%左右得到回收利用,因此这种预处理方式暂时难以推广。

1.3物理-化学法

物理-化学法是在高温条件下发生复杂物理化学反应的预处理技术。主要包括蒸汽爆破预处理、烘焙预处理和水热处理。

1.3.1蒸汽爆破预处理蒸汽爆破预处理技术是在高温(180~240℃)、高压蒸汽作用下通过瞬间泄压过程实现原料的组分离和结构变化,这一过程可由蒸汽爆破设备完成。任天宝等采用热重分析法对蒸汽爆破预处理玉米秸秆进行了分析研究。结果经预处理过的玉米秸秆与原样在同样加热速率条件下相比,最大热分解速率提高34.57%,指前因子提高8%~10%,活化能降低24.13%~32.56%。

杨昌炎等通过汽爆和发酵分级处理麦秸并热解后发现,产物中热解干气减少,热解液体相应增加且其中酸含量减少。这有利于进一步研究开发酸含量低的高品质生物油。Biswas等以柳树木屑为原材料进行爆破预处理,结果发现原料中灰分和碱金属含量下降。同时碳含量增加氧含量下降因而提升了热值。Xu等观察到蒸汽爆破预处理羊毛纤维残渣有利于热解后焦炭产量的增加,原因可能是预处理过程去除了生物质中一些松散的成分。由以上研究可以发现蒸汽爆破作为一种有前景的预处理技术,它能够提高热解速率,减少原料中的灰分及氧含量,从而提高热值,并能通过热解获得更高产量的焦炭以及低酸性的高品质生物油。

1.3.2烘焙预处理烘焙又称为低温热解,是一种常压和无氧的情况下,在200~300℃内慢速热解的过程。烘焙可以脱掉生物质中的水分及部分挥发分,提高其能量密度和可磨性,从而改善生物质特性。

朱波等通过对稻秆和棉秆烘焙预处理研究发现烘焙后生物质碳含量明显提高,水分及氧含量降低,能量密度提高,生物质可磨性提高,便于运输并有利于进一步的热解液化。王贵军等同样选用稻秆和棉秆作为材料,烘焙制得的生物质半焦也具有相似的性质:能量密度显著提高,可磨性得到改善并且具有了疏水性,从而便于储存运输和降低制粉能耗,是促进生物质大规模利用的有效方法。他推荐烘焙预处理条件为250℃、30min。

陈青等通过实验发现,烘焙过程可在一定程度上破坏生物质中的木质纤维结构,烘焙得到的固体产物氧碳比降低并具有多孔结构。邓剑等通过对稻秆的烘焙发现稻秆烘焙产物以固体焦和不凝结气体为主,还有少量水分和焦油。在最佳条件下预处理的固体产物质量产率为36%~60%,能量产率为40%~60%。施勇等研究了烘焙预处理对秸秆类生物质产物和气体浓度分布的影响,结果表明:随着烘焙温度的提升,挥发分含量升高,热解焦含量减低。热解气体产物中主要成分为CO和CO₂,较少的CH₄和微量的H₂,且焦量和气体的浓度分布不仅与热解温度有关,还与生物质种类的组成相关。

王贵军等进行的棉花秆和小麦秆N₂氛围下的低温热解试验得出了基本相同的结论。赵辉等的实验表明:生物质的能量产率随着烘焙温度的提高而降低,其中中温烘焙能获得较好的固体和能量产率,此外烘焙可降低制粉电耗并使其易磨,从而提供了一个将生物质的粒径减小和大规模利用的良好解决途径。Medic等对玉米不同部位(包括玉米秸、玉米茎、茎髓、茎壳和穗轴壳)烘焙时在不同气体逗留时间及颗粒大小密度下产量的变化进行了研究。结果表明:在280℃下烘焙的茎髓和250℃下烘焙的茎壳分别有最高(44%)和最低(13%)的干物质损失。在250℃下烘焙的茎髓有最低的能量密度(18~18.5MJ/kg),而在280℃下烘焙的茎壳有最高的能量密度(21.5MJ/kg)。

在280℃下的茎髓能量输出最低(59%),在250℃下处理的穗轴壳和茎壳能量输出最高(85%)。VanderStelt等也得到了和其他研究人员基本相同的结论:烘焙处理有利于去除生物质氧含量而获得更高能量密度的燃料。而不同的反应条件和生物原料会得到不同的固液气产物。Meng等研究烘焙后的木材发现,烘焙有利于改善油品的氧碳比,油的组分与未经烘焙制得的相比有变化,并且水含量降低但代价是生物油产量降低。

他得出结论烘焙预处理是一种可能改善生物油品质的方法。通过综述可以发现,研究人员对不同生物质烘焙后三态的组成成分已基本了解,同时烘焙后固体产物水分和含氧量降低,碳含量增加,可磨性提高,能量密度提高,且烘焙后制得的生物油氧碳比下降,水分含量降低,因此烘焙有利于进行包括加氢裂解等进一步提升油品的操作。然而烘焙后生物质原料依然存在含有大量碱金属的问题,从而可能腐蚀反应设备。因此可以从烘焙与其他预处理技术相结合入手做进一步的研究,目的是进一步提升生物燃料的特性,以利于生物质的热裂解。如Saddawi等通过洗涤预处理降低了生物质的碱金属和氯化物含量,使烘焙后的燃料性质得到改善,但预处理技术的结合会带来成本的增加,因此需要

综合考虑。

1.3.3 水热预处理 水热预处理可以定义为在高温高压的水中进行的反应, 通常压力为2~50MPa, 温度为150~600℃。根据反应物和反应温度等不同又可细分: 由水的临界温度分, 可将低于水的临界温度的反应称为亚临界水热反应, 高于水的临界温度的反应称作超临界水热反应; 当反应物中有氧时, 可将其称为水热氧化反应, 其中低于超临界温度的为亚临界水热氧化反应, 一般也被称为湿式氧化反应, 反之则为超临界水热氧化反应。水热处理可以使大量半纤维素和部分木质素溶解, 通过除去这些物理和化学屏蔽可以使生物质形成开放的结构。这种改进生物质结构和化学成分的预处理技术除了广泛应用在生物乙醇的制备上, 同样可以对热解的产物产生影响。

Stephanidis等对水热预处理生物质后热解得到的产物产量及生物油组分进行了研究, 结果表明, 水热处理的生物质与未经预处理和催化的生物质相比, 快速热解后得到的生物油中糖含量(主要是左旋葡聚糖)显著增加, 羧酸、酮类以及酚类化合物的浓度有所下降。微藻作为一种有潜力的生物质能源, 可以转化成高热量的热解生物油, 但由于生物油中含氮量高使它很难直接用作燃料。Du等通过水热预处理微藻, 无需添加过多能量即可除去微藻中的蛋白质, 从而降低生物油中的氮含量。此外, 与未处理的微藻相比, 样品有更高的碳含量, 灰分和热值。因此, 水热预处理技术是微藻转化为高品质油的重要手段。总的来说, 水热法作为一种在生化法处理生物质中常用的技术手段, 在热化学法上的应用和研究还很少, 依然存在较多空白。要注意的是水热作为一种热解手段、如果仅成为一种预处理方式, 成本会有所增加, 因此经济性需要得到更多的考虑。

1.4 生物法

一些研究表明某些菌株(如白腐菌、褐腐菌等)处理生物质样品有可能提高热解油的品质。生物预处理主要是降解了木质素从而可能使样品更易参与热解反应, 并使反应过程的能耗降低。曾叶霖根据生长速度初筛、木质纤维素组分改变复筛, 得到了用于玉米秸秆预处理的3株白腐菌: 大鬼、FW和BP5。其中大鬼和FW对木质纤维素组分改变明显, BP5对原料组分几乎没有改变, 大鬼及FW处理的原料热解后得到的生物油中苯酚类物质均有明显上升, 菌株BP5处理的原料热解后得到的生物油中酸类含量显著增加。因此曾叶霖认为生物预处理是有效的, 它使热解油品质发生了不同的变化。Zeng等对白腐菌及褐腐菌预处理玉米秸秆的研究表明: 白腐菌 *Irpex lacteus* CD2 有很高的降解木质素的能力, 使木质素失去了58%的质量, 预处理后生物油产量从16.8%提高到26.8%。褐腐菌 *Fomitopsis* IMER2 主要能够降解纤维素, 同时预处理后生物油产量从32.7%提高到50.8%。此外, 轻工业会产生生物质过程残渣, 如乙醇发酵残渣等。这部分残渣作为固体废弃物会污染环境, 因此应该妥善处理。

如可以用于气化发电, 但效率较低, 经济效益较差。也可以考虑用热化学法(如热解)处理残渣。如张斌等研究了木粉稀酸水解残渣的热解特性, 发现水解残渣的三相产物规律与未经稀酸水解的原生物质类似, 但是热解焦产率明显高于原生物质(为32%~45%)。

2 前景与展望

生物质预处理技术作为热解前期的必要步骤, 方法可谓多种多样。不同预处理方式对生物质化学组分、结构不同程度的改变使其在热解过程及热解产物分布上有所差异。一些预处理方法可以提高生物质热解效率或提高生物油品质及产量, 但真正能够起到显著作用并应用于工业生产的预处理技术却不成熟, 还处于不断探索的过程。生物质预处理今后的研究可以朝以下几个方向努力:

- 1) 努力提高各种预处理方法的效率并降低预处理技术的成本;
- 2) 深入分析各种预处理方法作用机理以及对生物质热解特性带来的影响, 为进一步改善现有预处理方法甚至发现新的预处理方法做准备;
- 3) 通过学科交叉探索新的物理化学生物预处理技术, 如借鉴更多生物预处理方法使生物质结构发生根本性改变。目标是使热解反应朝着预期的控制方向进行, 从而提高热解速率并得到更多的目标产物。
- 4) 可以改变思路, 使预处理技术不刻意提高生物油的品质和产量, 而是期望原料的预处理可以增加生物油中某些有特殊价值物质的含量或同时得到具有较高利用价值的气液固热解产物。

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/85898.html>